Journal of Agricultural Machinery
Vol. 9, No. 2, Fall - Winter 2019, p. 385-397

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۹، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۸، ص ۳۹۷-۳۸۵

بررسی هزینه ویژه سوخت کاربرد ترکیب سوخت‌های دیزل- بیودیزل- بیواتانول در یک موتور دیزل

گل محمد خوب بخت[1*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۱

چکیده

در طی سال‌های اخیر تلاش‌های فراوانی را در جهت صرفه‌جویی و مصرف منطقی نفت و گاز، بهینه‌سازی تجهیزات انرژی بر و جایگزینی سوخت‌های فسیلی با منابع انرژی تجدیدپذیر انجام داده‌اند. برای یک سوخت جایگزین سوخت دیزل بسیار مهم است که از نظر فنی و محیطی مورد قبول، از لحاظ اقتصادی، قابل رقابت و به آسانی در دسترس باشد. در این تحقیق به بررسی تاثیر بار و سرعت موتور و همچنین درصدهای مختلف اختلاط سوخت‌های دیزل، بیودیزل و بیواتانول بر روی عملکرد اقتصادی موتور دیزل OM 924 پرداخته شد. طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش آماری سطح پاسخ پایه‌ریزی شد و نقاط بهینه متغیرهای مستقل به‌منظور کمینه و یا بیشینه کردن سطوح پاسخ، به‌دست آمد. مدل‌های درجه دوم به‌دست آمده با استفاده از روش سطح پاسخ به‌منظور پیش‌بینی تاثیر متغیرهای ورودی بر روی سطوح پاسخ از لحاظ آماری (در سطح یک درصد) معنی‌دار بودند. نتایج نشان داد که با افزایش بار اعمالی به موتور هزینه ویژه سوخت در تمام اختلاط‌های سوختی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت موتور میزان هزینه ویژه سوخت در بارهای پایین به دلیل افزایش مصرف ویژه سوخت روند صعودی شدیدی دارد و در بارهای بالا و میانه این روند افزایشی، ملایم‌تر شده و در بارهای بالا با افزایش سرعت موتور هزینه ویژه سوخت ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. میزان هزینه ویژه سوخت با افزایش درصد بیواتانول و بیودیزل در سوخت‌های اختلاط‌یافته نسبت به سوخت دیزل افزایش یافت و سوخت دیزل کمترین میزان هزینه ویژه سوخت (۵۸۰ ریال به‌ازای هر کیلووات ساعت) را در سرعت ۲۱۳۹ دور بر دقیقه و بار کامل (۱۰۰ درصد) به خود اختصاص داد.

واژه‌های کلیدی: بیواتانول، بیودیزل، سطح پاسخ، سوخت، هزینه

مقدمه

بحران جهانی انرژی، بسیاری از کشورها را به جستجو برای منابع انرژی تجدیدپذیر واداشته است. محققان اخیراً جایگزینی سوخت‌های فسیلی را با سوخت‌های زیستی و به منظور کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی مورد توجه قرار داده‌اند. سوخت‌های زیستی موجب کاهش نشر گازهای گلخانه‌ای و واردات نفت می‌گردند. اخیراً بیواتانول، بیودیزل و تا حدودی روغن‌های گیاهی خالص به‌عنوان سوخت‌های زیستی مقبول و امیدبخش مورد توجه قرار گرفته‌اند (Subbaiah *et al.*, 2010). دو سوخت زیستی اکسیژن‌دار (بیودیزل و بیواتانول) به‌عنوان سوخت‌های جایگزین برای موتورهای دیزل مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند (به‌خاطر تجدیدپذیری و دوست‌دار محیط زیست بودن).

هزینه بیودیزل برای موتور احتراق داخلی کمی بیشتر از دیزل نفتی می‌باشد. مصرف سوخت ویژه بیودیزل بالاتر از دیزل نفتی می‌باشد. نتایج آزمایشات نشان داده است که متوسط مقدار SFC برای سوخت بیودیزل ۱۷ درصد بیشتر از دیزل نفتی است. آزمایشات دیگر بر روی موتورهای مختلف افزایشی در دامنه ۵ تا ۲۰ درصد را نشان می‌دهد. تحت این شرایط هزینه ویژه $4 kW h^{-1}$ یک افزایش ۲/۱ درصدی را نشان می‌دهد. اگر هزینه دو نوع سوخت مثل هم باشد، هزینه ویژه موتور بیودیزل ۹/۸ درصد بالاتر است (Carraretto *et al.*, 2004).

آرمز[2] و همکاران (۲۰۱۰) دریافتند که مصرف ویژه سوخت ترمزی[3] (BSFC) در B100، که ارزش گرمایی آن ۱۲/۹ درصد پایین‌تر از ارزش حرارتی B15 است، تقریباً ۱۲ درصد در مقایسه با B15 افزایش یافته بود. این آزمایش بر روی یک موتور دیزلی ریلی-

۱- استادیار، گروه مهندسی کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: gol.m1360@yahoo.com
DOI: 10.22067/jam.v9i2.64690

2- Armas
3- Brake specific fuel consumption

پاشش مستقیم- با دور موتور ۲۴۰۰ دور بر دقیقه انجام گرفت. لین[۱] و همکاران (۲۰۰۹) مصرف ویژه سوخت را برای ۸ نوع بیودیزل (متیل استر روغن‌های گیاهی) بر روی یک موتور چهار زمانه، تک سیلندر دیزلی، مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که مصرف ویژه سوخت بیودیزل نسبت به سوخت دیزل، ۹/۴۵ تا ۱۴/۶۵ درصد بیشتر است. لویان[۲] و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که اختلاف بین مصرف سوخت دیزل و بیودیزل خالص ۱۸/۵ درصد است و به‌خاطر چگالی بالای بیودیزل، تا ۱۳/۵ درصد حجمی قابل کاهش می‌باشد. قبادیان و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که میانگین حجمی مصرف ویژه سوخت برای اختلاط‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد، برای سرعت‌های مختلف، به‌ترتیب ۴، ۰/۸، ۰/۶، ۲/۲- و ۱/۴ درصد بیشتر از سوخت دیزل خالص می‌باشد. باوفا و همکاران در تحقیقی که بر روی شاخص‌های عملکردی موتور تراکتور MF- 399 و با استفاده از مخلوط‌های ۵ تا ۲۰ درصد بیودیزل و دیزل انجام دادند دریافتند که مصرف سوخت ویژه، به‌دلیل ارزش حرارتی و چگالی نزدیک بیودیزل و دیزل، کمترین افزایش را دارد (Bavafa *et al.*, 2014).

بیشتر محققان بر این باورند که مصرف سوخت بیودیزل به علت ارزش گرمایی پایین این سوخت، بیشتر از سوخت دیزل می‌باشد. بسیاری نیز معتقدند که افزایش مصرف سوخت در بیودیزل به علت چگالی بالای بیودیزل می‌باشد که تزریق سوخت زیادی را برای یک حجم و فشار معین اعمال می‌کند. بسیاری از محققان مصرف بالای سوخت بیودیزل را ناشی از ترکیب خصوصیات بیودیزل می‌دانند. به‌عنوان مثال: ارزش گرمایی پایین بیودیزل و چگالی بالا یا ترکیب گرانروی بالا و ارزش گرمایی پایین و یا تعامل چگالی و گرانروی بالا با ارزش حرارتی پایین بیودیزل (Xue *et al.*, 2011).

اقتصادی بودن موتور بیودیزل از نوع موتور و شرایط عملیات از قبیل بار، سرعت، زمان و فشار پاشش و غیره تاثیر می‌پذیرد. کرابکتس[۳] (۲۰۰۹) دریافت که مصرف ویژه سوخت بیودیزل با توربوشارژ به طور میانگین ۱۷/۷ درصد پایین‌تر از مصرف سوخت یک موتور چهار زمانه دیزلی بدون توربوشارژر است.

مهمترین فاکتور اقتصادی در هزینه‌های ورودی تولید بیودیزل، هزینه مواد خام می‌باشد که در حدود ۸۰ درصد هزینه کل بهره‌برداری را در بر دارد. در حال حاضر قیمت بیودیزل چربی حیوانی ۰/۴ الی ۰/۵ دلار در لیتر می‌باشد در حالی‌که قیمت روغن‌های گیاهی با تبادل استری سنتی، ۰/۶ الی ۰/۸ دلار در لیتر است. کاهش قیمت ۰/۱ تا ۰/۳ دلار در لیتر در نتیجه به‌کارگیری فناوری جدید ممکن می‌باشد. هزینه BTL (زیست‌توده مایع شده) از لیگنو سلولز بیش از ۰/۹ دلار در لیتر می‌باشد که پتانسیل کاهش قیمت تا ۰/۷ الی ۰/۸ دلار در لیتر را دارد (Anonymous, 2007).

در میان مواد خام برای تولید بیواتانول، نیشکر کمترین هزینه تولید را دارد چرا که این محصول بیشترین عملکرد را نسبت به ذرت دارد. تولید بیواتانول در برزیل ارزان‌تر از آمریکا یا اروپا می‌باشد. در اروپا هزینه تولید بیواتانول زیستی به‌طور میانگین سه برابر بیشتر از برزیل و دو برابر بیشتر از آمریکا می‌باشد (Biofuels Platform, 2010). استفاده از نیشکر برای تولید بیواتانول از نظر بازده انرژی مطلوب‌تر است. بازده انرژی برای تبدیل ذرت به بیواتانول تقریباً ۱ به ۱/۶۳ می‌باشد یعنی برای هر یک کالری انرژی مصرف شده برای تولید بیواتانول، ۱/۶۳ کیلو کالری توسط بیواتانول تولید شده به‌دست می‌آید (Kim and Dale, 2005). مساله مهم دیگر هزینه تمام شده انرژی‌های فسیلی در صنعت به منظور تبدیل شکر به بیواتانول می‌باشد. باگاس نیشکر چهار برابر انرژی کمتری از ذرت نیاز دارد (۱/۶ بیلیون کالری برای نیشکر در برابر ۶/۶ بیلیون برای ذرت) (Andreoli and Souza, 2007). از آنجایی که روش‌های مختلفی برای تولید بیواتانول اتخاذ شده است و همچنین مشکلاتی در محاسبه هزینه‌های غیر مستقیم وجود دارد، برآورد هزینه‌های تولید بیواتانول از مواد لیگنو سلولزی مشکل می‌باشد. طبق برآورد تولید بیواتانول از سلولز، بیشترین جزء هزینه سرمایه‌ای، برای تهیه کردن مواد خام (۱۷٪)، تبدیل به قند و تخمیر (۱۵٪) و انرژی مورد نیاز برای بویلرها و توربوژنراتورها (۳۶٪) می‌باشد (Solomon *et al.*, 2007). در مورد تولید بیواتانول از تخمیر پنتوسیس[۴] (مونوساکاریدی که ۵ اتم کربن دارد) بسیاری از محققان برآورد کرده‌اند که هزینه تولید نهایی، ۰/۴۸ دلار به‌ازای هر لیتر می‌باشد. پرهزینه‌ترین مرحله تولید مربوط به تخمیر (۳۱٪) و بعد از آن سم‌زدایی هیدرولیزی (۲۲٪) و آماده‌سازی برای هیدرولیز مواد خام (۱۲/۵) می‌باشد. هزینه‌هایی مانند تقطیر، کارگر، ماده تلقیحی، ۳۵٪ کل هزینه‌ها را شامل می‌شود (Von Sivers *et al.*, 1994).

مواد و روش‌ها

موتور تحت آزمایش

موتور تحت آزمایش در این تحقیق، موتور چهار سیلندر دیزلی پاشش مستقیم مدل OM924LA از تولیدات شرکت ایدم تبریز می‌باشد. شکل ۱ نمایی از موتور مورد نظر را نشان می‌دهد. این موتور مجهز به سامانه پمپ واحد و نازل‌های ۵ تا ۹ سوراخه و سیستم کنترل الکترونیکی و دارای توربوشارژر و اینتر کولر و سیستم ترمز خفه‌کن می‌باشد. این موتور با استاندارد یورو ۴ و ۵ با کاتالیست SCR

1- Lin
2- Luján
3- Karabektas
4- Pentoses

به سیستم تزریق AdBlue مجهز شده است. برای مصارف مختلف از جمله کامیونت، مینی‌بوس، دیزل ژنراتور، جرثقیل‌های متحرک، ماشین‌های صنعتی، کشاورزی و راه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مشخصات کامل موتور مورد استفاده در تحقیق حاضر در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱- موتور مورد آزمایش OM 924
Fig. 1. Tested engine OM 924

جدول ۱- مشخصات موتور مورد آزمایش
Table 1- Main characteristics of the diesel engine

مشخصه **Specification**	مقدار **Value**
مدل (Model)	OM924LA
تعداد سیلندر (Number of cylinders)	4
سامانه خنک‌کاری (Cooling system)	پمپ آبی (Water pump)
بیشترین توان موتور (Maximum power)	160kW
بیشترین گشتاور (Maximum torque)	810 N.m
بیشترین سرعت (Maximum rotational speed)	2800 rpm
سامانه پاشش سوخت (Injection pump type)	انژکتور ردیفی (Row type)

سامانه اندازه‌گیری سوخت مصرفی

سامانه اندازه‌گیری سوخت مصرفی در شکل ۱ (الف) نشان داده شده است. در این سامانه از روش وزنی[1] برای اندازه‌گیری مقادیر مصرف سوخت برای هر ردیف از پارامترهای دور و بار موتور و مخلوط سوخت استفاده شد. سامانه مورد نظر دارای چهار شیلنگ بود که همگی به مخزن سوخت متصل بودند. یکی از شیلنگ‌ها به ورودی موتور، یکی به هوای آزاد و شیلنگ دیگری به خروجی سوخت از موتور متصل شده بود. شیلنگ چهارم نیز به یک الکترو پمپ متصل بوده و از این طریق مخزن سوخت سامانه پر می‌گردید. خروجی این سامانه نیز به یک رایانه متصل بود که میزان مصرف سوخت موتور براساس کیلوگرم بر ساعت و وزن سوخت بر اساس کیلوگرم بر روی صفحه نمایشگر آن قابل مشاهده بود. شکل ۲ (ب) نمایش آهنگ وزنی مصرف سوخت و میزان سوخت موجود در مخزن را نشان می‌دهد.

چگونگی محاسبه هزینه ویژه سوخت

هزینه ویژه سوخت، به هزینه مورد نیاز برای تولید یک کیلو وات ساعت کار واقعی اطلاق می‌شود و با استفاده از رابطه (۱) به‌دست می‌آید که در این رابطه، SFC[2] بیانگر هزینه ویژه سوخت بر حسب ریال بر کیلووات ساعت ($Rial\ kW^{-1}\ h^{-1}$)، Q، نشان‌دهنده میزان مصرف سوخت بر حسب لیتر بر ساعت، C، بیانگر هزینه سوخت بر حسب ریال بر لیتر می‌باشد و P توان تولیدی بر حسب کیلووات می‌باشد.

$$SFC = \frac{Q \times C}{P} \qquad (۱)$$

برای محاسبه هزینه ویژه سوخت، قیمت سوخت‌های دیزل، بیودیزل و بیواتانول به‌ترتیب ۶۰۰۰، ۵۰۰۰۰ و ۳۵۰۰۰۰ ریال در یک لیتر اعمال گردید. سوخت بیودیزل مورد آزمایش از روغن کلزا تهیه شده بود. بیواتانول مورد نیاز نیز از شرکت بیدستان قزوین خریداری شد که از ملاس نیشکر و چغندرقند تهیه شده بود.

روش انجام آزمایش‌ها

آزمون‌ها در قالب یک تست کوتاه مدت و با هدف مقایسهٔ عملکرد اقتصادی و پارامترهای عملکرد موتور بین مخلوط‌های مختلف سوخت دیزل، بیودیزل و بیواتانول انجام گرفت. متغیرهای تحت کنترل بار اعمالی از طرف دینامومتر به موتور، سرعت موتور و نوع سوخت (مخلوط‌های مختلف دیزل- بیودیزل- بیواتانول) می‌باشد. کلیه آزمایش‌ها در شرایط استاندارد و بدون تغییر در ساختار فنی و ساختمانی موتور انجام شد. روش انجام آزمایش‌ها به این صورت بود که ابتدا موتور با سوخت مورد آزمایش به مدت ۱۵ دقیقه برای رسیدن به حالت پایدار و عادی به‌صورت درجا کار می‌کرد. سپس طبق جدول آزمایش‌ها که طبق روش سطح پاسخ و با استفاده از طرح مرکب مرکزی تدوین گردیده بود، بار و سرعت مورد نظر به‌وسیله پانل کنترل دینامومتر اعمال گردید.

1- Scale method of determination of consumed fuel

2- Specific fuel costs



(a) (الف) (b) (ب)

شکل ۲– سامانه اندازه‌گیری سوخت مصرفی (شکل الف)، نمایش آهنگ وزنی مصرف سوخت و میزان سوخت موجود در مخزن (شکل ب)

Fig. 2. Fuel consumption measuring system (a), Fuel consumption in mass basis and the amount of fuel in the tank (b)

طراحی آزمایش‌ها

در این تحقیق از روش سطح پاسخ که یکی از روش‌های طراحی آزمایش می‌باشد، استفاده شد. در طراحی آزمایش، مطابق با رابطه (۲) که در آن x_1, x_2, x_3 و ... پارامترهای مختلف، ε خطای آزمایش و y خروجی می‌باشد، هدف آن است که با تغییر دادن پارامترهای در نظر گرفته شده از یک مقدار به مقدار دیگر، شرایطی به‌وجود آورده شود که در خروجی تغییراتی مشاهده شود. سپس با استفاده از روش‌های تحلیل داده‌های آزمایش، میزان تأثیر هریک از پارامترها را بررسی کرده و برای مقادیر جدید پارامترها، خروجی پیش‌بینی شود و در صورت نیاز فرآیند بهینه‌سازی گردد (Myers and Montgomery, 2002).

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots) + \varepsilon \qquad (۲)$$

در این تحقیق، از نرم‌افزار SAS (نسخه شماره ۹/۱)، جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها، بهینه‌سازی نتایج، رسم نمودارها و شکل‌های گرافیکی استفاده گردید. این نرم‌افزار به‌عنوان یکی از نرم‌افزارهای تخصصی آمار برای کنترل کیفیت، کار بر روی اعداد، تجزیه و تحلیل داده‌های خام و طراحی آزمایش‌های مختلف در دنیا شناخته شده است و از قابلیت‌های خاصی از جمله کاربرد در صنعت و اقتصاد برخوردار می‌باشد.

طرح مورد استفاده در این تحقیق به نام طرح مرکب مرکزی می‌باشد (Castillo, 2007). طرح مرکب مرکزی با انتخاب صحیح پارامتر α (سطح فاکتور) برای نقاط محوری، دوران‌پذیر شده و در آن برای هر متغیر پنج سطح تعیین می‌شود. در واقع سطوح مشخص شده به‌صورت بازده (α) تا (α−) تعریف می‌شوند که در آن حدود کمینه و بیشینه با کد سطح‌های (۱) و (۱−) مشخص شده و سطح پنجم نیز به‌عنوان سطح مرکزی یا صفر (۰) در نظر گرفته می‌شود (Myers and Montgomery, 2002). متغیرهای مستقل در این تحقیق عبارتند از نسبت‌های مختلف سوخت‌های بیواتانول، بیودیزل و دیزل، بار و سرعت موتور و پاسخ مورد نظر هزینه ویژه سوخت می‌باشد. در جدول ۲ متغیرهای مستقل به همراه سطوح کد شده و کد نشده برای آزمون موتور ارائه شده است.

روش به‌کار رفته در این تحقیق مدلی از نوع درجه دوم ارائه خواهد داد که رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته را بیان می‌کند. مدل مورد نظر به‌صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_{11}x_1^2 \\ + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + a_{44}x_4^2 \\ + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 \\ + a_{14}x_1x_4 + a_{23}x_2x_3 \\ + a_{24}x_2x_4 + a_{34}x_3x_{34} \end{aligned} \qquad (۳)$$

که در آن x_1، x_2، x_3 و x_4 به‌ترتیب چهار متغیر مستقل یعنی مقدار حجمی بیودیزل در یک لیتر گازوئیل، مقدار حجمی بیواتانول در یک لیتر گازوئیل، سرعت دورانی موتور و بار اعمالی به موتور می‌باشند و برای سادگی معادله این متغیرها به‌ترتیب با B (بیودیزل)، E (بیواتانول)، S (سرعت) و L (بار) در تمام مدل‌ها نشان داده خواهد شد. در جدول ۳ فهرست آزمایش‌های مورد نظر بر اساس طرح مرکب مرکزی و در سطوح انتخابی متغیرها ارائه شده است.

جدول ۲- کدگذاری سطوح متغیرهای مستقل در روش مورد مطالعه
Table 2- Coded levels of the independent variables in the study method

متغیر مستقل Independent variables	سطوح کد شده متغیرها Variable levels				
	-1	**- 0.5**	**0**	**0.5**	**1**
نسبت بیودیزل به دیزل (لیتر) Biodiesel/diesel ratio (L)	0:1	0.2:1	0.4:1	0.6:1	0.8:1
نسبت بیواتانول به دیزل (لیتر) Ethanol/diesel ratio (L)	0:1	0.1:1	0.2:1	0.3:1	0.4:1
سرعت موتور (دور بر دقیقه) Engine speed (rpm)	1000	1450	1900	2350	2800
بار موتور (درصد) Engine load (%)	20	40	60	80	100

جدول ۳- فهرست آزمایش‌های مورد نظر بر اساس طرح مرکب مرکزی در سطوح کد شده و کد نشده (واقعی) متغیرهای مستقل
Table 3- The considered tests based on central design at coded and not coded levels of variables

شماره آزمایش Experiment number	درصد بیودیزل در مقدار سوخت Percentage of biodiesel in fuel mixture (%)		درصد بیواتانول در مقدار سوخت Percentage of bioethanol in fuel mixture (%)		سرعت دورانی موتور Engine speed (rpm)		بار موتور Engine load (%)	
	کدگذاری Coded	غیر کدگذاری Not coded	کدگذاری Coded	غیر کدگذاری Not coded	کدگذاری Coded	غیر کدگذاری Not coded	کدگذاری Coded	غیر کدگذاری Not coded
1	-0.5	15.4	-0.5	7.7	-0.5	1450	-0.5	40
2	-0.5	15.4	-0.5	7.7	-0.5	1450	0.5	80
3	-0.5	15.4	-0.5	7.7	0.5	2350	-0.5	40
4	-0.5	15.4	-0.5	7.7	0.5	2350	0.5	80
5	-0.5	13.3	0.5	20	-0.5	1450	-0.5	40
6	-0.5	13.3	0.5	20	-0.5	1450	0.5	80
7	-0.5	13.3	0.5	20	0.5	2350	-0.5	40
8	-0.5	13.3	0.5	20	0.5	2350	0.5	80
9	0.5	35.3	-0.5	5.9	-0.5	1450	-0.5	40
10	0.5	35.3	-0.5	5.9	-0.5	1450	0.5	80
11	0.5	35.3	-0.5	5.9	0.5	2350	-0.5	40
12	0.5	35.3	-0.5	5.9	0.5	2350	0.5	80
13	0.5	31.6	0.5	15.8	-0.5	1450	-0.5	40
14	0.5	31.6	0.5	15.8	-0.5	1450	0.5	80
15	0.5	31.6	0.5	15.8	0.5	2350	-0.5	40
16	0.5	31.6	0.5	15.8	0.5	2350	0.5	80
17	-1	0	0	16.6	0	1900	0	60
18	1	40	0	10	0	1900	0	60
19	0	28.6	-1	0	0	1900	0	60
20	0	22.2	1	22.2	0	1900	0	60
21	0	25	0	12.5	-1	1000	0	60
22	0	25	0	12.5	1	2800	0	60
23	0	25	0	12.5	0	1900	-1	20
24	0	25	0	12.5	0	1900	1	100
25	0	25	0	12.5	0	1900	0	60
26	0	25	0	12.5	0	1900	0	60
27	0	25	0	12.5	0	1900	0	60
28	0	25	0	12.5	0	1900	0	60
29	0	25	0	12.5	0	1900	0	60
30	0	25	0	12.5	0	1900	0	60
31	0	25	0	12.5	0	1900	0	60

نتایج و بحث

تدوین مدل ریاضی و اعتبارسنجی آن برای مشخصه هزینه ویژه سوخت

برای مشخصه هزینه ویژه سوخت (هزینه تولید یک کیلووات ساعت توان) موتور، مدلی ریاضی از مرتبه دوم و بر اساس چهار متغیر (نسبت‌های حجمی بیودیزل و بیواتانول، بار و سرعت موتور) و با استفاده از روش سطح پاسخ به‌صورت رابطه (۳) ارائه گردید. جدول تجزیه واریانس به‌دست آمده توسط نرم‌افزار، برای مدل‌های کلی و پیش‌بینی هزینه ویژه سوخت به‌صورت جدول ۴ می‌باشد. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، P-value مدل‌های کلی و پیش‌بینی کمتر از ۰/۰۱ می‌باشد و این نشان می‌دهد که این مدل‌ها قادرند تاثیرات متغیرهای مستقل را روی هزینه ویژه سوخت با اطمینان بیشتر از ۹۹ درصد برآورد کنند. جملات درجه اول، درجه دوم از لحاظ آماری در سطح ۰/۰۱ و اثر متقابل آنها نیز در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار می‌باشند و اعتبار لازم برای ورود به معادله را دارند. بنابراین اعتبار مدل از لحاظ آماری تأیید می‌گردد. P-value آزمون عدم برازش برای مدل کلی و پیش‌بینی به‌ترتیب ۰/۱۴۸۶ و ۰/۱۲۰۶ به‌دست آمد که نشان‌دهنده رد فرض عدم برازش مناسب معادلات است. به بیان دیگر معادلات درجه دوم ارائه شده توسط روش سطح پاسخ به‌خوبی می‌تواند تاثیرات غیر از مرتبه اول بر هزینه ویژه سوخت را پیش‌بینی کنند و مدل برازش شده بر اساس داده‌های آزمایش، مناسب تشخیص داده می‌شود.

جدول ٤- تجزیه واریانس برای مدل‌های کلی و پیش‌بینی هزینه ویژه سوخت

Table 4- Analysis of variance the total and predictive models of specific fuel costs

منبع (Sourse)	درجه آزادی (DF)	مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	F	P-value
(Master model) مدل کلی					
(Model) مدل	14	40132629	2866616	166.1508	0.0001
(Linear) عبارت خطی	4	37344107	9336027	541.1218	0.0001
(Square) عبارت درجه دو	4	1938019	484504.7	28.08218	0.0001
(Cross product) عبارت متقابل	6	850503	141750.5	8.215944	0.0004
(Error) اشتباه	16	276049.6	17253.1		
(Lack of fit) عدم تناسب	10	236889.7	23688.97	3.629578	0.0641
(Pure Error) اشتباه خالص	6	39159.88	6526.646		
(Total) کل	30	40408679			
(Predictive model) مدل پیش‌بینی					
(Model) مدل	10	40028158	4002816	210.3864	0.0001
(Error) اشتباه	20	380520.5	19026.02		
(Lack of fit) عدم تناسب	14	341360.6	24382.9	3.7359	0.1206
(Pure Error) اشتباه خالص	6	39159.88	6526.646		
(Total) کل	30	40408679			

تجزیه واریانس عبارات مدل هزینه سوخت ویژه و ضرایب مدل کد شده در جدول ۵ نشان داده شده است. مقادیر P-value برای عبارت‌های مدل به تفکیک پارامترهای بیودیزل، بیواتانول، سرعت و بار موتور در این جدول ارائه شده است. عبارت‌هایی که مقدار P-value آنها کمتر از ۰/۰۵ باشد وارد مدل می‌شوند. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود فاکتورهای درجه اول بیودیزل، بیواتانول، سرعت و بار موتور تاثیر معنی‌داری (در سطح یک درصد) بر روی هزینه ویژه سوخت دارند. بنابراین وارد مدل پیش‌بینی می‌شوند. در میان عبارات خطی به‌جز بار موتور که رابطه عکس با هزینه ویژه سوخت دارد بقیه جملات رابطه مستقیم با این مشخصه دارند و با توجه به ضرایب عبارات خطی، بیودیزل بیشترین تاثیر را بر روی هزینه ویژه سوخت داشت.

جدول ۵- تجزیه واریانس عبارات مدل هزینه سوخت ویژه و ضرایب مدل کد شده

Table 5- Variance analysis of specific fuel costs and coefficients of the coded model

عبارت (Sourse)	درجه آزادی (DF)	ضریب Estimate	مجموع مربعات (SS)	F	P-value
بیودیزل (Biodiesel)	1	2148.918	27707082	1605.919	0.0001
بیواتانول (Ethanol)	1	924.281	5125772	297.0929	0.0001
سرعت دورانی (Spead)	1	411.0962	1014001	58.7721	0.0001
بار (Load)	1	-763.463	3497252	202.7029	0.0001
بیودیزل × بیودیزل (Biodiesel × Biodiesel)	1	-679.122	824283.5	47.77597	0.0001
بیودیزل × بیواتانول (Biodiesel× Ethanol)	1	-484.381	234625	13.59901	0.0021
بیودیزل × سرعت (Biodiesel× Spead)	1	82.81086	6857.639	0.397473	0.5373
بیودیزل × بار (Biodiesel× Load)	1	-154.38	23833.06	1.381378	0.2571
بیواتانول × بیواتانول (Ethanol× Ethanol)	1	-242.273	104903.9	6.080292	0.0254
بیواتانول × سرعت (Ethanol× Spead)	1	-26.2511	689.1222	0.039942	0.8441
بیواتانول × بار (Ethanol× Load)	1	-270.354	73091.08	4.236403	0.0562
سرعت × سرعت (Spead× Spead)	1	527.4172	497152.9	28.81528	0.0001
سرعت × بار (Spead× Load)	1	-715.127	511407.1	29.64146	0.0001
بار × بار (Load× Load)	1	413.4836	305561	17.7105	0.0007

P -value تمام عبارت‌های درجه دوم کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد و تمام این عبارات اعتبار لازم را از لحاظ آماری برای ورود به مدل پیش‌بینی دارند. از میان این عبارات بیودیزل و بیواتانول رابطه عکس و سرعت و بار موتور رابطه مستقیم با هزینه ویژه سوخت دارند. از میان عبارت‌های متقابل (ضریب بین دو متغیر) عبارت‌های متقابل بیودیزل × بیواتانول و سرعت × بار از لحاظ آماری معنی‌دار بوده و هر دو با یک رابطه معکوس با متغیر وابسته، وارد مدل شده‌اند. یعنی با افزایش این عبارات میزان هزینه ویژه سوخت کاهش می‌یابد. در حالی‌که بقیه عبارت‌ها رابطه معنی‌داری با هزینه ویژه سوخت نداشته و وارد مدل نمی‌شوند. مقادیر R^2 و R^2 تعدیل شده به‌ترتیب ۹۸/۰۸ درصد و ۹۷/۴۳ درصد برای مدل پیش‌بینی به‌دست آمد. این بدین معناست که حدود ۹۸/۰۸٪ از تغییرات متغیر وابسته (هزینه ویژه سوخت) توسط متغیرهای مستقل (بیودیزل، بیواتانول، بار و سرعت موتور) قابل تبیین می‌باشد. مدل به‌دست آمده بر اساس داده‌های کد نشده عبارت است از:

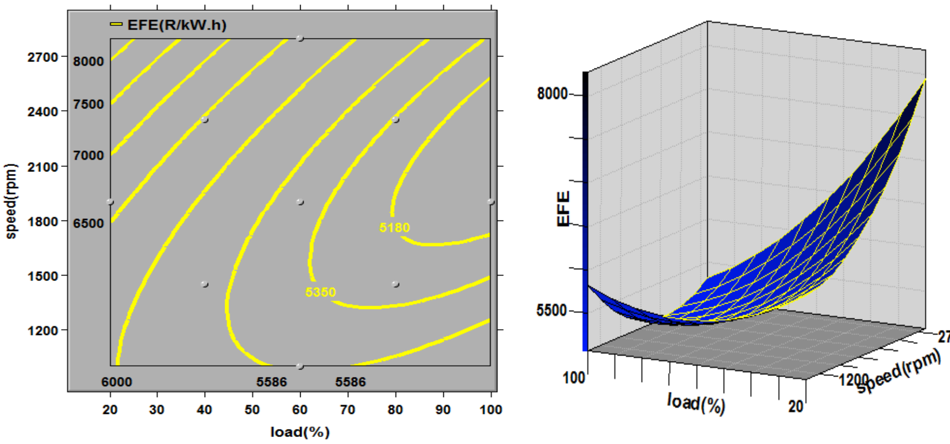
$$\boldsymbol{EFC} = 2267.556 + 9978.855\boldsymbol{B} + 9466.04\boldsymbol{E} - 0.82565\boldsymbol{S} - 12.35501\boldsymbol{L} - 4244.51\boldsymbol{B^2} - 6054.763\boldsymbol{BE} - 6056.826\boldsymbol{E^2} + 0.000651\boldsymbol{S^2} - 0.019865\boldsymbol{SL} + 0.258427\boldsymbol{L^2} \quad (۴)$$

که در آن SFC (Specific fuel cost) بیانگر هزینه ویژه سوخت بر حسب ($R\ kW^{-1}\ h^{-1}$)، B نشان‌دهنده نسبت حجمی بیودیزل در مخلوط سوخت، E بیانگر نسبت حجمی بیواتانول در مخلوط سوخت، S سرعت موتور بر حسب دور بر دقیقه و L بار موتور بر حسب درصد می‌باشد. مقدار ضریب ثابت مدل کدشده برابر با ۵۴۵۲/۸۵ می‌باشد.

تاثیر سرعت و بار موتور بر روی هزینه ویژه سوخت در سوخت اختلاط‌یافته

تاثیر بار موتور بر روی هزینه ویژه سوخت در شکل ۳ به صورت نمودار کانتور و رویه برای اختلاط $D_{62.5}B_{25}E_{12.5}$ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش بار اعمالی به موتور هزینه ویژه سوخت کاهش می‌یابد. به طوری که در سرعت‌های پایین با شیبی ملایم و با افزایش سرعت، نمودار با شیب تندتری کاهش می‌یابد. هزینه سوخت ویژه رابطه مستقیم با مصرف ویژه سوخت دارد و با افزایش بار موتور مصرف ویژه سوخت کاهش می‌یابد. بنابراین هزینه سوخت ویژه نیز کاهش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش سرعت موتور میزان هزینه ویژه سوخت در بارهای پایین به دلیل افزایش مصرف ویژه سوخت (به دلیل افزایش مصرف سوخت نسبت به توان) روند صعودی شدیدی دارد و در بارهای بالا و میانه این روند افزایشی، ملایم‌تر شده و در بارهای بالا با افزایش سرعت موتور هزینه ویژه سوخت ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. در بارهای متوسط و به‌خصوص بالا، در سرعت‌های پایین میزان مصرف ویژه سوخت به دلیل افزایش نسبت سوخت به هوا، افزایش می‌یابد و متناسب با افزایش سرعت و در نتیجه کاهش نسبت سوخت به هوا مصرف ویژه سوخت که رابطه مستقیم با هزینه ویژه سوخت دارد کاهش می‌یابد. اما در بار و سرعت‌های بالا مصرف ویژه سوخت به دلیل کاهش بازده حجمی افزایش می‌یابد در نتیجه هزینه ویژه سوخت نیز متناسب با آن افزایش می‌یابد.

(b) (ب) (a) (الف)



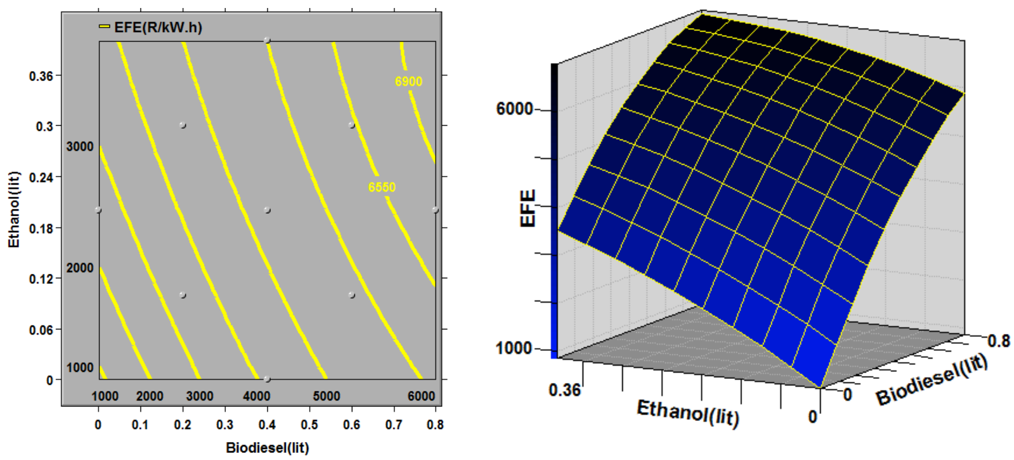
شکل ۳– نقشه رویه (شکل الف) و نقشه تراز (شکل ب) تاثیر متغیرهای بار و سرعت موتور بر روی هزینه ویژه سوخت بر حسب ریال کیلووات ساعت برای سوخت $D_{62.5}B_{25}E_{12.5}$

Fig. 3. (a) Surface and (b) Contour plots of the effects of engine load and speed on the specific fuel costs for the fuel of $D_{62.5}B_{25}E_{12.5}$

تاثیر سوخت بیودیزل بر روی هزینه ویژه سوخت در سوخت اختلاط‌یافته

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود با افزایش میزان غلظت بیودیزل میزان هزینه ویژه سوخت کاهش پیدا می‌کند. با افزایش درصد بیودیزل در سوخت اختلاط‌یافته، به دلیل پایین بودن ارزش گرمایی بیودیزل نسبت به سوخت دیزل مصرف ویژه سوخت نیز افزایش پیدا می‌کند، در نتیجه هزینه ویژه سوخت که رابطه مستقیم با مصرف ویژه سوخت دارد افزایش می‌یابد.

(ب) (b) (الف) (a)



شکل ٤– نقشه رویه (شکل الف) و نقشه تراز (شکل ب) تاثیر متغیرهای نسبت حجمی بیودیزل و بیواتانول بر روی هزینه ویژه سوخت بر حسب ریال کیلووات ساعت در سرعت (rpm)۲۸۰۰ و بار کامل

Fig. 4. (a) Surface and (b) contour plots of the effects of volumetric ratio of biodiesel and ethanol on specific fuel costs in full load and 2800 rpm

تاثیر سوخت بیواتانول بر روی هزینه ویژه سوخت در سوخت اختلاط‌یافته

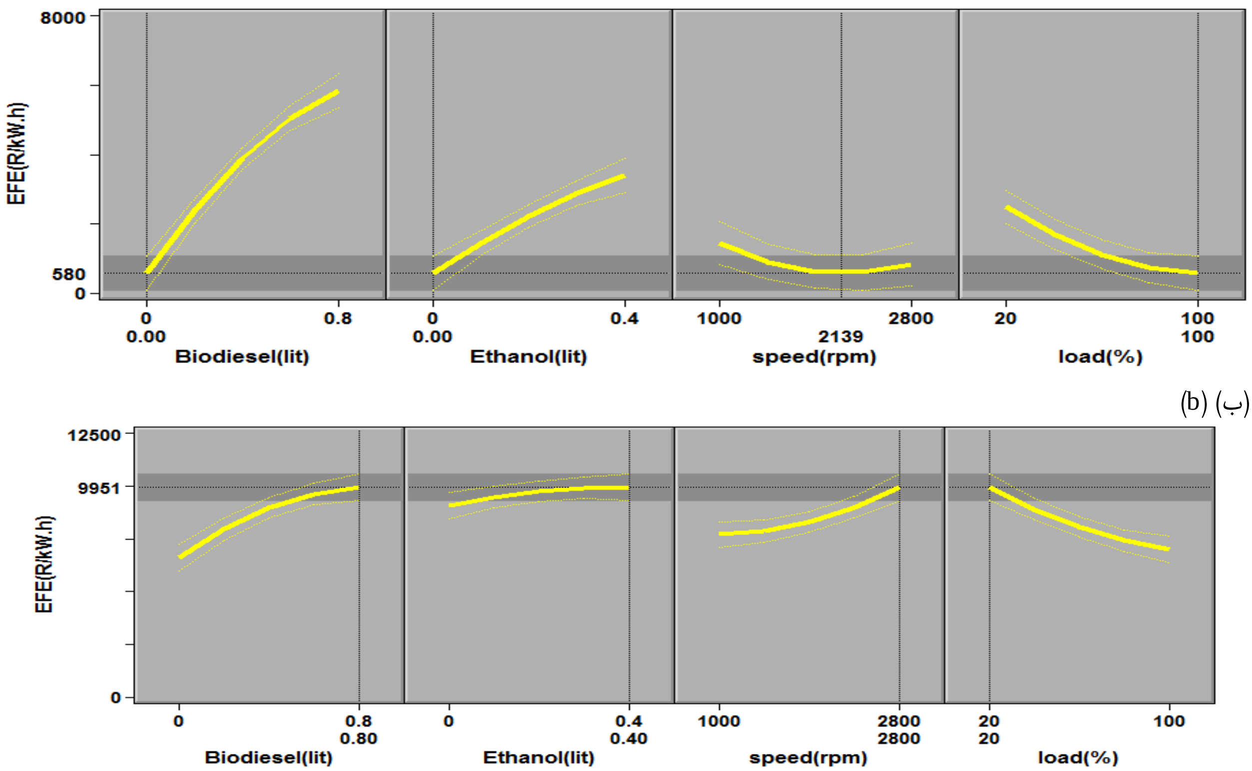
با افزایش درصد بیواتانول نیز میزان هزینه ویژه سوخت نیز افزایش پیدا می‌کند. دلیل این افزایش به‌خاطر این است که ارزش گرمایی سوخت بیواتانول بسیار پایین‌تر از سوخت دیزل می‌باشد بنابراین برای تولید یک توان ثابت و در یک مدت زمان مشخص باید موتور با میزان بیشتری از سوخت بیواتانول تغذیه شود، در نتیجه هزینه ویژه سوخت افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود از درصدهای میانه به بالای بیواتانول با افزایش غلظت بیودیزل روند افزایشی بیودیزل ملایم‌تر شده و در درصدهای بالای این دو نوع سوخت در اختلاط، هزینه ویژه سوخت شیب ملایم‌تری به خود می‌گیرد. زیرا به دلیل بالاتر بودن ارزش گرمایی بیودیزل نسبت به سوخت بیواتانول، افزایش غلظت سوخت بیودیزل نسبت به سوخت بیواتانول، موجب افزایش ارزش گرمایی اختلاط و در نتیجه کاهش مصرف ویژه سوخت و به دنبال آن کاهش هزینه ویژه سوخت خواهد شد. همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است روند افزایشی نمودار هزینه به‌واسطه افزایش غلظت بیودیزل شیب تندتری نسبت به سوخت بیواتانول دارد و این به علت بالا بودن قیمت سوخت بیودیزل نسبت به سوخت بیواتانول می‌باشد. در ایران قیمت تمام شده سوخت‌های زیستی بیودیزل و بیواتانول بیشتر از سوخت‌های فسیلی می‌باشد و این به دلیل بالا بودن هزینه تولید محصولات مولد این سوخت‌ها می‌باشد همچنین عدم تولید این سوخت‌ها به‌صورت عمده و صنعتی باعث بالا رفتن هزینه تولید آنها می‌شود. پایین بودن قیمت سوخت‌های فسیلی باعث شده است که از این‌گونه سوخت‌ها کمتر و یا اصلاً استفاده نشود ولی در کشورهای اروپایی و آمریکای لاتین به دلیل بالا بودن قیمت سوخت‌های فسیلی و همچنین پایین بودن هزینه تولید اینگونه سوخت‌ها در طی سال‌های اخیر توجه زیادی به استفاده از اینگونه سوخت‌ها در خودروها صورت گرفته است.

بهینه‌سازی هزینه ویژه سوخت برای متغیرهای بیودیزل، بیواتانول، سرعت و بار موتور

شکل ۵ بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ را برای پیدا کردن نقاط بهینه متغیرهای مستقل به منظور کمینه و بیشینه کردن هزینه ویژه سوخت نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل الف مشاهده می‌شود کمترین میزان هزینه ویژه سوخت ۵۸۰ ریال به ازای هر کیلووات ساعت توان تولیدی بود که برای سوخت دیزل خالص ($D_{100}B_0E_0$) و در سرعت ۲۱۳۹ دور بر دقیقه و بار کامل (۱۰۰ درصد) اتفاق افتاد. همچنین بیشترین میزان هزینه ویژه سوخت در سوخت اختلاط یافته‌ی ۰/۸ لیتر بیودیزل و ۰/۴ لیتر بیواتانول در یک لیتر سوخت دیزل ($D_{45.2}B_{36.6}E_{18.2}$)، سرعت ۲۸۰۰ دور بر دقیقه و بار اعمال ۲۰ درصد موتور و به میزان ۹۹۵۱ ریال به‌ازای هر کیلووات ساعت توان تولیدی به‌دست آمد. همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است سوخت بیودیزل به‌خاطر قیمت بالای آن، تاثیر بیشتری بر روی هزینه ویژه سوخت نسبت به متغیرهای دیگر دارد.

(الف) (a)

(ب) (b)



شکل ۵- نقاط بهینه متغیرهای مستقل به منظور کمینه کردن هزینه ویژه سوخت (شکل الف) و بیشینه کردن این مشخصه (شکل ب)

Fig. 5. The optimum points of experimental variables to (a) maximize the specific fuel costs and (b) minimize the specific fuel costs of engine

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی امکان استفاده از اختلاط مختلف سوخت‌های دیزل- بیودیزل- بیواتانول در موتور دیزل پرداخته شد و تاثیر بار و سرعت موتور و همچنین نسبت‌های حجمی مختلف اختلاط سوخت‌های دیزل، بیودیزل و بیواتانول بر روی مشخصه اقتصادی موتور مورد بررسی قرار گرفت و نتایج ذیل به‌دست آمد؛

مدل‌های درجه دوم پیش‌بینی، برای مشخصه اقتصادی از نظر آماری در سطح یک درصد معنی‌دار شناخته شد، به‌طوری که متغیرهای مستقل بار، سرعت موتور و نسبت‌های حجمی مختلف بیودیزل و بیواتانول در سوخت‌های اختلاط‌یافته به‌خوبی توانستند تغییرات متغیرهای وابسته (سطوح پاسخ) را پیش‌بینی کنند.

با افزایش بار اعمالی به موتور هزینه ویژه سوخت در تمام اختلاط‌های سوختی کاهش یافت. این کاهش در بارهای پایین با شدت بیشتری بود اما با افزایش سرعت موتور این دو مشخصه در بارهای پایین افزایش و در بارهای میانه و بالا (با افزایش بار) ابتدا کاهش و سپس افزایش یافتد.

با افزایش سرعت موتور میزان هزینه ویژه سوخت در بارهای پایین به دلیل افزایش مصرف ویژه سوخت (به دلیل افزایش مصرف سوخت نسبت به توان) روند صعودی شدیدی دارد و در بارهای بالا و میانه این روند افزایشی، ملایم‌تر شده و در بارهای بالا با افزایش سرعت موتور هزینه ویژه سوخت ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

با افزایش درصد بیودیزل و بیواتانول در سوخت‌های اختلاط یافته، هزینه ویژه سوخت نسبت به سوخت دیزل افزایش پیدا کرد و این روند افزایش با اضافه کردن بیواتانول شدت بیشتری داشت و کمترین میزان هزینه ویژه سوخت برای سوخت دیزل خالص و در سرعت ۲۱۳۹ دور بر دقیقه و بار کامل (۱۰۰ درصد) و به میزان R ۵۸۰ kW^{-1} h^{-1} اتفاق افتاد.

References

1. Andreoli, C., and S. P. De souza. 2007. a melhor alternativa para conversão da energia solar e fóssil em etanol. Econ Energy 59: 27-33.

2. Anonymous. 2007. International Energy Agency (IEA). Biodiesel statistics. IEA energy technology essentials. Paris: OECD/IEA; January 2007.
3. Armas, O., K. Yehliu, and A. L. Boehman. 2010. Effect of alternative fuels on exhaust emis- sions during diesel engine operation with matched combustion phasing. Fuel 89: 438-56.
4. Bavafa, M., M. Tabasizadeh, A. Farzad, B. Ghobadian, and H. Eshghi. 2014. Effect of poultry fat oil biodiesel on tractor engine performance. Journal of Agricultural Machinery 6 (1): 14-24.
5. Biofuels Platform. 2010. ENERS Energy Concept. Production of biofuels in the world; 2010 (available online bhttp://www.biofuels-platform.ch/en/infos/production.php? id=bio-ethanolN last visited: 26 Feb 2010).
6. Carraretto, C., A. Macor, A. Mirandola, A. Stoppato, and S. Tonon.2004. Biodiesel as alternative fuel: experimental analysis and energetic evaluations. Energy 29: 2195-211.
7. Castillo, E. D. 2007. PROCESS OPTIMIZATION: A Statistical Approach. New York: Springer.
8. Ghobadian, B., H. Rahimi, A. M. Nikbakht, Gh. Najafi, and T. F. Yusaf. 2009. Diesel engine performance and exhaust emission analysis using waste cooking biodiesel fuel with an artificial neural network. Renew Energy 34: 976-82.
9. Karabektas, M. 2009. The effects of turbocharger on the performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with biodiesel. Renew Energy 34: 989-93.
10. Kim, S., and B. E. Dale. 2005. Environmental aspects of ethanol derived from no-tilled corn grain: nonrenewable energy consumption and greenhouse gas emissions. Biomass Bioenergy 28: 475-89.
11. Lin, B. F., J. H. Huang, and D. Y. Huang. 2009. Experimental study of the effects of vegetable oil methyl ester on DI diesel engine performance characteristics and pollutant emissions. Fuel 88: 1779-85.
12. Luján, J. M., V. Bermúdez, B. Tormos, and B. Pla. 2009. Comparative analysis of a DI diesel engine fuelled with biodiesel blends during the European MVEG-A cycle: Performance and emissions (II). Biomass Bioenergy 33: 948-56.
13. Myers, R. H., and D. C. Montgomery. 2002. Response Surface Methodology. Process and Product Optimization Using Designed Experiments, 2nd ed.; John Wiley & Sons: New York.
14. Solomon, B. D., J. R. Barnes, and K. E. Halvorsen. 2007. Grain and cellulosic ethanol: history, economics, and energy policy. Biomass Bioenergy 31:416-25.
15. Subbaiah, G. V., K. R. Gopal, and S. A. Hussain. 2010. The Effect of Biodiesel and Bioethanol Blended Diesel Fuel on the Performance and Emission Characteristics of a Direct Injection Diesel Engine. Iranica Journal of Energy and Environment 3: 211-221.
16. Von Sivers, M., G. Zacchi, L. Olsson, and B. Hahn-Hägerdal. 1994. Cost analysis of ethanol from willow using recombinant Escherichia coli. Biotechnol Prog 10: 555-60.
17. Xue, J., T. E. Grifta, and A. C. Hansen. 2011. Effect of biodiesel on engine performances and emissions. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15: 1098-1116.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 9, No. 2, Fall - Winter 2019, p. 385-397

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۹، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۸، ص ۳۹۷-۳۸۵

Evaluation of the Specific Fuel Costs for Combination of Diesel Fuel- Biodiesel - Bioethanol in a Diesel Engine

G. Khoobbakht[1*]

Received: 28-05-2017
Accepted: 02-12-2017

Introduction

The researchers have been currently focused on replacing fossil fuels by biofuels to reduce dependence on fossil fuels. Biofuels provide low greenhouse emissions with the reduction of oil import. The biofuels can play an important role economically becomes more clear when their relatively developed agricultural sector is taken into account. Bioethanol, biodiesel and to a lesser extent pure vegetable oils are recently considered as most promising biofuels. Since 19 century, ethanol has been used as a fuel for the diesel engines. The cost of bio-diesel for IC engine is slightly greater than that of diesel oil. The specific fuel consumption, a function of the engine speed, is higher in bio-diesel than in diesel oil. The results previously of Bench-test indicated that the average value of SFC for bio-diesel was 17% greater than that of diesel oil. As for the properties of biodiesel, the lower heating value, higher density and higher viscosity play a primary role in engine fuel consumption for biodiesel. Most of the authors, who agreed that fuel consumption increased for biodiesel compared to diesel, contributed to the loss in the heating value of biodiesel. Of course, some authors only explained the increased fuel consumption as the result of the higher density of biodiesel, which causes a higher mass injection for the same volume at the same injection pressure.

Materials and Methods

The equipment and instruments used in the present research were a diesel engine (OM 314), a dynamometer, a dynamometer control panel and a fuel tank. A four-cylinder direct injection diesel engine, model OM 314, made by Idem Company, Tabriz, Iran, was used to conduct the experiments. The fuel used in the present research was from waste oil. Ethanol was also used to feed the engine. The blends of diesel–ethanol–biodiesel were prepared on a volumetric basis. The experiments were conducted based on the response surface methodology and using Central Composite Rotatable Designs (CCRD). The response surface methodology, as one of the best methods to optimize processes and determine the effect of different variables on the responses, has special popularity among researchers. Applied research design in this study was CCRD that has the most application among other designs of the method. Independent variables were different ratios of ethanol, biodiesel, and diesel, engine load, and engine rotational speed and responses were included engine brake specific fuel consumption.

Results and Discussion

The P-values for both total and prediction models of specific fuel costs were less than 0.01. This result showed that the models statistically have high abilities to predict the impacts of independent variables on specific fuel costs at 1% probability level. The linear, quadratic and interaction of the overall model had a P-value less than 0.05 that indicated their statistical validity. The specific fuel costs decreased for all blends by increasing the engine load. The reduction of specific fuel costs was more aggressively observed in low loads. With increasing engine rotational speed, the specific fuel costs were increased at low loads and at middle and high loads it was decreased and then increased. The increasing of volume ratio of biodiesel in the blended fuels, specific fuel costs were increased. By increasing the volumetric ratio of ethanol and biodiesel, specific fuel costs were increased due to lower calorific value and the direct relationship of this variable with brake power compared to that of diesel fuel in all test conditions and all fuel blends. By increasing of biodiesel ratio in the blended fuels, the specific fuel costs were increased at the low percentage of ethanol ratio. But by the increase of ethanol ratio the specific fuel consumption firstly was increased and then slightly decreased at high levels of biodiesel.

1- Assistant Professor, Department of Agricultural Engineering, Payame noor University, Tehran, Iran
(*- Corresponding Author Email: gol.m1360@yahoo.com)

Conclusions

The minimum of the specific fuel costs (580 R $kW^{-1}h^{-1}$) occurred at full load and engine rotational speed of 2139 rpm for pure diesel ($B_0E_0D_{100}$). Also, the maximum of specific fuel consumption was obtained by 9951 R $kW^{-1}h^{-1}$ at 20% engine load and rotational speed of 2800 rpm and for a fuel blend containing 0.8 l biodiesel, 0.4 l ethanol and 1l diesel ($B_{45.2}E_{36.6}D_{18.2}$).

Keywords: Biodiesel, Cost, Ethanol, Response surface